

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2018.5.76

中图分类号: TM306

文献标志码: A

新型集成式 DRV8301 驱动 BLDCM 的 控制器设计

邵文权, 赵肖雄, 吕 涛, 程 远

(西安工程大学电子信息学院, 西安 710048)

摘要: 针对无刷直流电机 BLDCM (brushless DC motor) 的精确控制和快速动态响应的需求, 设计了一种新型集成式 DRV8301 驱动 BLDCM 的控制器。在分析 PID 控制算法的基础上, 采用增量型 PID 算法实现速度闭环调节; 采用 TMS320F28035 型 DSP 为控制器主控芯片, 设计了高集成度的驱动保护电路、三相桥式逆变电路以及转子位置检测电路, 简化了硬件电路结构, 并完成了控制器的软件设计。实验结果验证了所设计的 BLDCM 控制器具有良好的控制精度和动态响应性能。

关键词: 控制器; PID; 集成式; 三相桥式逆变电路; 无刷直流电机

Novel Controller Design for Brushless DC Motor Driven by Integrated DRV8301

SHAO Wenquan, ZHAO Xiaoxiong, LYU Tao, CHENG Yuan

(School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: A novel controller of brushless DC motor (BLDCM) driven by integrated DRV8301 was designed to meet the requirement of accurate control and fast dynamic response of BLDCM. Based on the analysis of PID control algorithm, closed-loop speed regulation was realized by adopting the incremental PID algorithm; digital signal processor (DSP) TMS320F28035 was used as the main control chip of the controller, and a highly integrated drive and protection circuit, a three-phase bridge inverter circuit, and a rotor position detection circuit were designed to simplify the hardware structure; moreover, the controller's software design was also completed. Experimental results demonstrated that the designed BLDCM controller had better control accuracy and dynamic response performance.

Keywords: controller; PID; integrated; three-phase bridge inverter circuit; brushless DC motor (BLDCM)

无刷直流电机 BLDCM (brushless DC motor) 以良好的调速性能和较大的启动转矩等优点被广泛应用于航空航天、数控机床等领域^[1-3]。随着电力电子技术、新型高性能磁性材料以及自动化技术的快速发展, 对于无刷直流电机性能和控制精度的要求

也日益提高^[4-5]。因此, 研究 BLDCM 控制器的控制算法以及设计高精度、高性能的 BLDCM 控制器具有重要的实用意义。

传统的 BLDCM 控制系统通常采用多路、独立式驱动保护电路来控制电机, 电路设计复杂、稳定性差、效率较低。为进一步提高 BLDCM 控制系统的快速性、稳定性和鲁棒性, 本设计采用浮点型 TMS320F28035 作为主控芯片, 采用集成式 DRV8301 作为驱动芯片, 应用增量式 PID 算法完成 BLDCM 的速度闭环调节, 实现了 BLDCM 控制器对电机的精确控制。

收稿日期: 2016-08-23; 修回日期: 2018-04-16

基金项目: 西安工程大学博士启动基金资助项目 (BS1018); 西安工程大学青年学术骨干支持计划资助项目

Project Supported by Ph.D. Programs Foundation of Xi'an Polytechnic University (BS1018); Youth Academic Backbone Support Plan of Xi'an Polytechnic University

1 PID 控制算法简介

本文在 BLDCM 控制器软件中引入增量式 PID 控制策略作为该系统控制算法的基础,结合传统无刷电机的数学模型^[6-7]完成该控制系统软件和硬件的总体设计。

增量式 PID 算法表达式^[8]为

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p[e(k) - e(k-1)] +$$

$$\frac{K_p T}{T_1} e(k) + \frac{K_p T_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) - e(k-2)] \quad (1)$$

式中: $k, k-1, k-2$ 为采样次数; $e(k)$ 为第 k 次采样输出偏差值; $\Delta u(k)$ 为输出控制量的增量; K_p, T_1, T_D 和 T 分别为比例系数、积分时间、微分时间和采样周期。软件控制程序中 PID 参数为 $K_p=7.5, T_1=0.3 \text{ s}, T_D=0.000 \text{ 2 s}, T=0.001 \text{ s}$ 。

2 硬件设计

2.1 BLDCM 控制系统硬件总体结构框图

BLDCM 控制系统硬件结构框图如图 1 所示,主要包括主控单元电路、驱动单元电路、三相逆变电路和转子位置检测电路。其中主控单元电路包括 TMS320F28035 及外围电路、保护电路;驱动单元电路包括 DRV8301 及外围电路、多组独立供电电源;三相逆变电路包括电压、电流采样电路^[9]和桥式逆变电路;转子位置检测电路包括霍尔传感器电路、隔离滤波电路。

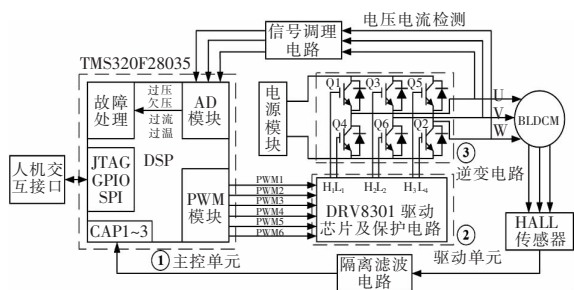


图 1 BLDCM 控制系统硬件框图

Fig1 Block diagram of hardware in BLDCM control system

2.2 主控单元电路设计

BLDCM 控制器的主控单元电路及其外围电路

如图 2 所示。主控单元电路采用 TI 公司 C2000 系列 32 位 CPU、内核频率高达 60 MHz 的数字信号处理器 TMS320 F28035 芯片为核心,内部嵌有高级定时器、AD 模块和丰富的增强型外设端口,包括增强型脉宽调制器(EPWM)、增强型捕捉(CAP)、增强型正交编码器(EQEP)等;且其拥有的可编程浮点算术加速器独立于主 CPU 之外的代码执行,极大地提高了数字信号响应和处理速度,增强了 BLDCM 控制器对电机的实时调控性能。

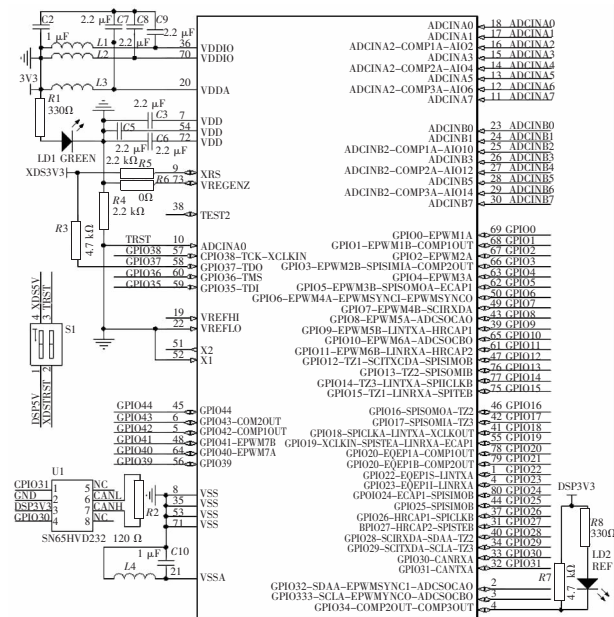


图 2 TMS320F28035 及其外围电路

Fig.2 TMS320F28035 and its peripheral circuit

2.3 驱动单元电路设计

BLDCM 控制器的驱动单元电路及其外围电路如图 3 所示。本设计采用具有欠压、过压及过温保护的 DRV8301 驱动电路,内部经逻辑电路转换可输出控制三相逆变电路的 3 路高压侧和 3 路低压侧驱动信号,相比于传统的设计复杂、驱动延时、抗干扰能力弱的驱动电路,DRV8301 具有响应更迅速、效率更高、稳定性更强等优点;且其拥有的 TPS54160 降压转换器可提供给 DSP 或其他外围电路 5 V 输出,节约多路辅助触发电源,提高了控制器的供电可靠性;DRV8301 将来自 DSP 的 6 路信号隔离放大,输出 6 路具有驱动能力的信号,使其分别控制逆变电路中的 6 个 IRF1010 型功率管的

导通或关断^[10],从而达到控制电机的目的。

2.4 三相桥式逆变电路设计

三相桥式逆变电路如图 4 所示。以 U 相为例来说明功率管工作原理,当 $H_1=0$ 且 $L_1=1$ 时,VT1 导通,VT4 关闭;当 $H_1=1$ 且 $L_1=0$ 时,VT1 关闭,VT4 导通;当 $H_1=1$ 且 $L_1=1$ 时,VT1、VT4 均关闭;其他两相情况与此类同。

本设计通过检测高精度采样电阻 R_{26} 和 R_{23} 实现对电流信号的采集,经驱动芯片的高性能电流分流放大器放大后输入 DSP 的 ADCINB0、ADCINB1 端口和 DRV8301 的 FAULT 引脚,经过 ADC 转化

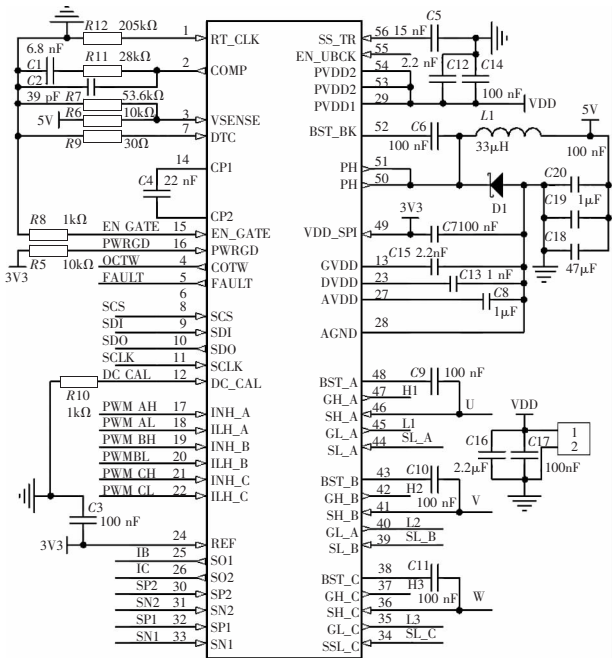


图 3 DRV8301 及外围电路

Fig.3 DRV8301 and peripheral circuit

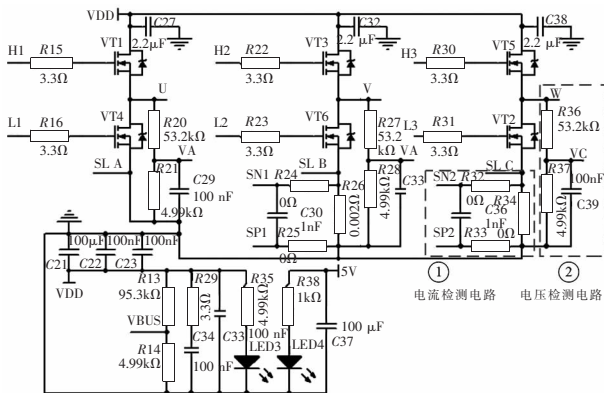


图 4 三相桥式逆变电路

Fig.4 Three-phase bridge inverter circuit

后得到电流信息。当过流关断信号输入 FAULT 引脚端口电压达到驱动三极管 A5SHB 导通时,DRV8301 关断所有逻辑输出,通过 DSP 的外部中断口 INTO 触发过流中断保护。在电机绕组回路接入电压检测电路以便实时获取电压,当 VA、VB、VC 端电压超过 SPI 命令编程所设定的电压阈值 3.3 V 时,DSP 启动过压保护动作。

2.5 转子位置检测电路设计

转子位置检测电路如图 5 所示。3 个空间相差 120° 角度分布的高精度霍尔传感器围绕在 BLDCM 周围,输出相位互差 120° 电角度且脉宽为 180° 电角度的方波信号,输出的转子位置信号经数字隔离器 ISO7230 后输入 DSP 的增强型捕捉 CAP 口^[11],通过实时检测中断信息来获取转子位置信号和换相时刻,输出经 PID 调节的转速信号到驱动单元,完成转子位置的检测和转速的计算。

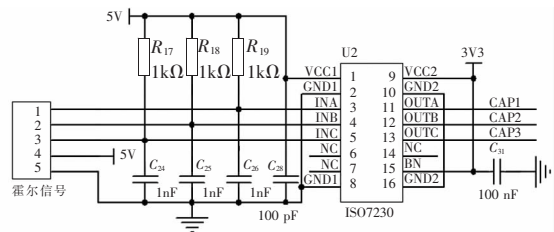


图 5 霍尔信号接口电路

Fig.5 Hall signal interface circuit

3 软件设计

DSP 主程序流程如图 6 所示。本设计采用转矩

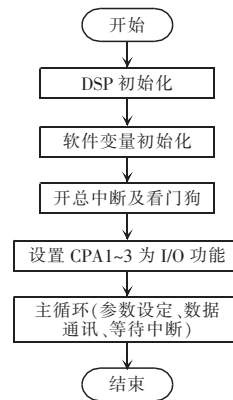


图 6 主程序流程

Fig.6 Flow chart of main program

脉动较小的单极性 PWM 控制方式实现对电机的速度调节^[12],软件设计主要包括主程序、CAP 捕获中断程序、PWM 中断程序和 A/D 采集程序等。主程序主要完成系统寄存器的初始化、参数设定、故障处理以及数据通讯等功能。

4 实验结果

BLDCM 控制器实验平台如图 7 所示。无刷直流电机具体参数为:额定电压 $U_N=24\text{ V}$,额定功率 $P_N=100\text{ W}$,额定转速 $n_N=3\ 000\text{ r/min}$,额定转矩 $T=0.5\text{ N}\cdot\text{m}$,相数为 3,极对数 $P=2$ 。

无刷直流电机逆时针运行时 DSP 输出的 6 路 PWM 信号波形如图 8 所示。根据 IRF1010 型功率管的工作特性,通过 DTC 引脚编程 300 ns 的死区时间可避免同相上下桥臂直通时产生的大电流对驱动芯片和功率管造成的损坏。利用 RPL2316 逻辑探头得到 DSP 输出 6 路 PWM 信号的逻辑时序图。高电平为 1,低电平为 0。由图 8 可以看出,PWM1、PWM3、PWM5 的波形依次为高电平状态,良好的控制精度确保控制器输出的 PWM4、PWM6、PWM2 波形依次处于相应的互补状态^[13],从而使无

刷直流电机精确高效地换相运行。

BLDCM 控制器正常运行时的换相波形如图 9 所示。在 VT5 和 VT6 的波形均处于高电平时,导通相为 $W\rightarrow V$,其他功率管截止;在 VT5 和 VT4 的波形均处于高电平时,导通相为 $W\rightarrow U$,其他功率管截止;其他换相区的分析与此类同,不再赘述。实验结果符合两两导通三相六状态的理论分析^[14-15],功率管快速精确的导通体现了控制器较高的控制精度和良好的动态性能。

霍尔信号波形如图 10 所示。在一个周期 $T=9.04\text{ ms}$ 内包括 1 个上升沿和下降沿,所以相位依次互差 120° 电角度的 3 路霍尔信号对应 6 个位置信号(100-110-010-011-001-101),这 6 种状态分别持续 60° 电角度,实验结果符合霍尔传感器的变化规律^[16]。

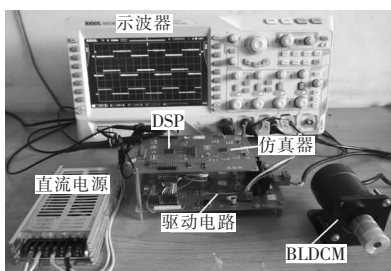


图 7 BLDCM 控制器实验平台

Fig.7 Experimental platform of BLDCM controller

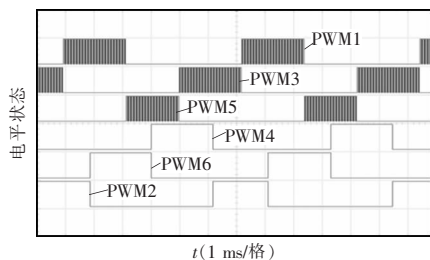


图 8 PWM 信号波形

Fig.8 Waveforms of PWM signals

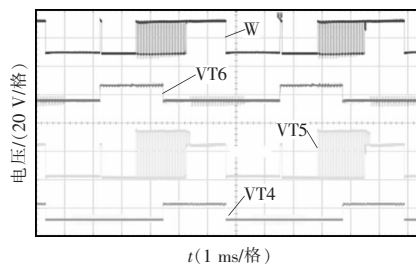


图 9 W、VT6、VT5、VT4 触发信号波形

Fig.9 Waveforms of trigger signals in phases W, VT6, VT5, and VT4

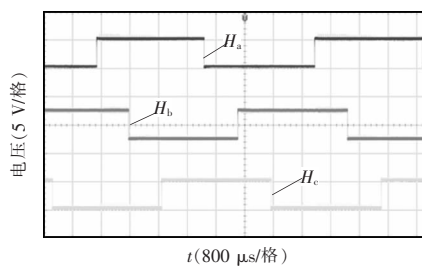


图 10 霍尔信号波形

Fig.10 Waveform of Hall signals

三相绕组首端对母线负极电压波形如图 11 所示。在电机旋转 360° 过程中,U、V、W 三相输出依次互差 120° 电角度的信号驱动电机运转,保证了电机可以快速、稳定、高效地工作。系统在换相期间和两两导通期间均会发生微小的转矩脉动^[17],主要是由电流换相造成的。

电机绕组 W 相电压和 C 相电阻 R_{34} 所在支路

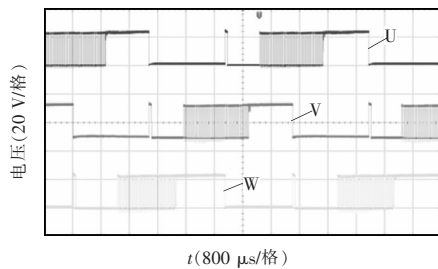


图 11 U、V、W 相输出电压波形

Fig.11 Waveform of output voltage in phases U, V and W

电流波形如图 12 所示。按照两两导通三相六状态的工作原理,在绕组 W 相导通期间,U、V 相下桥臂导通,W 相下桥臂关断。但由于电容 C_{36} 的充放电过程,所以 W 相下桥臂所在支路的电流不会立刻突变为 0,而是渐变为 0。该系统从 0 加速至恒速过程中,电压和电流波形变化平缓,电机运行稳定,体现了该控制器对无刷直流电机良好的动态控制性能。

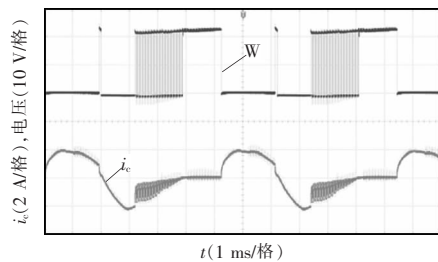


图 12 W 相电压和 i_c 输出波形

Fig.12 Waveform of output of W-phase voltage and current i_c

5 结语

本文以增量式 PID 控制算法为核心,设计了一种采用 DSP 处理器的集成式 BLDCM 控制器。该控制器充分利用 DSP 的高速运算能力,采用集成式驱动电路代替传统的多路、独立式驱动电路,简化了硬件电路设计并提高了控制器的可靠性。试验结果表明所设计的 BLDCM 控制器运行稳定可靠、控制精度较高,具有良好的动态性能,充分显示了所设计方案的有效性和可行性。

参考文献:

[1] 夏长亮,方红伟. 永磁无刷直流电机及其控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 25-34.

Xia Changliang, Fang Hongwei. Permanent-magnet brushless DC motor and its control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 25-34(in Chinese).

- [2] Wang Yingfa, Xia Changliang, Zhang Maohua, et al. Adaptive speed control for brushless DC motors based on genetic algorithm and RBF neural network[J]. IEEE International Conference on Control and Automation, China, 2007, 22(6): 379-384.
- [3] 方炜,张辉,刘晓东. 无刷直流电机双闭环控制系统的设计[J]. 电源学报, 2014, 12(2): 35-42.
- Fang Wei, Zhang Hui, Liu Xiaodong. Design of the brushless DC motor control system of double-loop[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(2): 35-42(in Chinese).
- [4] 王兆安,刘进军. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.
- [5] Lin Yongkai, Lai Y S. Pulse width modulation technique for BLDCM drives to reduce commutation torque ripple without caculation of commutation time[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2011, 47(4): 1786-1793.
- [6] Chen Chenghu, Cheng Mingyang. Implementation of a highly reliable hybrid electric scooter drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2462-2473.
- [7] 殷帅,吕彩琴,马铁华. 抑制无刷直流电机换相转矩脉动的新型电流控制[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(8): 47-52.
- Yin Shuai, Lü Caiqin, Ma Tiehua. Novel current control method to suppress commutation torque ripple for brushless DC motor[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(8): 47-52(in Chinese).
- [8] 丁学文,陈增禄. 电力拖动运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.
- [9] Wu Qingqing, Tian Wenchao. Design of permanent magnet brushless DC motor control system based on DSP-IC30F4012[J]. Procedia Engineering, 2012, 29(3): 4223-4227.
- [10] 张丛鹏,邢庆辉. 基于 ARM Cortex-M4 的永磁无刷直流调速系统设计[J]. 微特电机, 2016, 44(1): 90-92.
- Zhang Congpeng, Xing Qinghui. Design of permanent magnet brushless DC speed-regulating system based on ARM Cortex-M4[J]. Small & Special Electrical Machines, 2016, 44(1): 90-92(in Chinese).
- [11] 赵亮,刘星桥,韩彬,等. 基于 DSP 的无刷直流电机模糊控制系统的设计[J]. 电力电子技术, 2009, 43(5): 40-42.

- Zhao Liang, Liu Xingqiao, Han Bin, et al. Design of fuzzy control system for BLDCM based on DSP[J]. Power Electronics, 2009, 43(5): 40-42(in Chinese).
- [12] 张爱军, 程时兵, 朱军伟, 等. 基于 DSP+CPLD 的无刷直流电机三环控制设计[J]. 电力电子技术, 2012, 46(11): 106-108.
- Zhang Aijun, Cheng Shibing, Zhu Junwei, et al. Design of BLDCM triple-loop control based on DSP+CPLD[J]. Power Electronics, 2012, 46(11): 106-108(in Chinese).
- [13] 吴红雪, 杨威, 杨世彦. 基于 TMS320F28027 的数字控制移相全桥 DC/DC 变换器设计[J]. 电源学报, 2012, 10(4): 24-28.
- Wu Hongxue, Yang Wei, Yang Shiyan. Design of phase-shifted full-bridge DC/DC converter based on digital control with TMS320F28027[J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(4): 24-28(in Chinese).
- [14] 颜晓鹏, 钟汉如. 基于 TMS320F28035 的小功率 BLDCM 速度控制系统[J]. 微特电机, 2014, 42(8): 96-100.
- Yan Xiaopeng, Zhong Hanru. Low-power brushless DC motor speed control system based on TMS320f28035[J]. Small & Special Electrical Machines, 2014, 42(8): 96-100(in Chinese).
- [15] 徐刚, 袁文, 陈锦杰. 低压大电流无刷直流电机驱动器设计[J]. 微特电机, 2014, 42(2): 75-78.
- Xu Gang, Yuan Wen, Chen Jinjie. Design of the high current and low voltage brushless DC motor drives[J]. Small & Special Electrical Machines, 2014, 42(2): 75-78(in Chinese).
- [16] Liu Yong, Zhu Z Q, Howe D. Commutation-torque-ripple minimization in direct-torque-controlled PM brushless DC drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(4): 1012-1021.
- [17] 李珍国, 王江浩, 高雪飞, 等. 一种合成电流控制的无刷直流电机转矩脉动抑制系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5592-5599.
- Li Zhenguo, Wang Jianghao, Gao Xuefei, et al. Torque ripple reduction systems for brushless DC motors with resultant current control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5592-5599(in Chinese).



邵文权

作者简介:

邵文权(1978-),男,通信作者,博士,副教授,研究方向:电机智能控制,E-mail:shaowenquan@xpu.edu.cn.

赵肖雄(1990-),男,硕士研究生,研究方向:电机智能控制,E-mail:zhaoxiaoxiong308@163.com.

吕涛(1992-),男,硕士研究生,研究方向:电力系统保护与控制,E-mail:377951392@qq.com.

程远(1985-),男,硕士,助教,研究方向:新能源并网技术,E-mail:chengyuan@xpu.edu.cn.